

引用格式: 曹君, 陈燕飞, 熊志林, 等. 含Ce稀土镁合金激光焊接接头的微观组织及力学性能[J]. 航空材料学报, 2026, 46(4): 108-116.

CAO Jun, CHEN Yanfei, XIONG Zhilin, et al. Microstructures and mechanical properties of laser welded joints in Ce-containing rare earth magnesium alloys[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(4): 108-116.

含Ce稀土镁合金激光焊接接头的微观组织 及力学性能

曹君^{1,2}, 陈燕飞^{1,2,3*}, 熊志林^{1,2}, 李思嘉^{1,2}

(1. 湖南工业职业技术学院 机械工程学院, 长沙 410208; 2. 装备质量特性检测与评估技术湖南省工程研究中心, 长沙 410208; 3. 南昌大学 先进制造学院, 南昌 330031)

摘要: 焊接热循环过程中, 热影响区内析出相分布特征与微观形貌的改变, 极易导致焊接接头出现典型的热影响区软化, 使其成为整个接头中最薄弱的环节。本工作提出一种融合光纤激光焊接工艺与高热稳定含Ce稀土析出相协同作用的焊接策略, 通过调控熔化区和热影响区的析出相结构, 一方面改善焊缝熔化区和热影响区析出相结构, 另一方面显著缩窄热影响区尺寸、降低热影响区软化, 进而整体提升焊接接头力学性能。结果表明: 焊缝熔化区内形成大量微米/亚微米级析出相颗粒, 这些颗粒弥散分布在枝晶臂边缘, 有效钉扎位错、阻碍变形过程中位错的运动, 从而强化熔化区; 同时, 热影响区内保留的高热稳定的稀土析出相则一定程度地维持合金原有的组织结构, 使热循环过后热影响区的宽度控制在 100 μm 左右, 显著降低焊接热循环对热影响区微观组织的影响。拉伸性能结果表明, 经Ce元素微合金化及激光焊工艺优化后, 焊接接头表现出良好的力学性能, 所得接头拉剪强度达母材的 74.4%, 证明该焊接策略在实现稀土镁合金高质量连接方面的可行性与有效性。

关键词: 稀土; 镁合金; 激光焊接; 微观组织; 调控机制

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000127

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2025.000127

中图分类号: TG442; V252.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)04-0108-09

Microstructures and mechanical properties of laser welded joints in Ce-containing rare earth magnesium alloys

CAO Jun^{1,2}, CHEN Yanfei^{1,2,3*}, XIONG Zhilin^{1,2}, LI Sijia^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan Industry Polytechnic, Changsha 410208, China; 2. Hunan Engineering Research Center of Equipment Quality Characteristic Testing and Evaluation Technology, Changsha 410208, China; 3. School of Advanced Manufacturing, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: During the welding thermal cycle, changes in the distribution and morphology of precipitates within the heat-affected zone (HAZ) often lead to typical softening, making HAZ the weakest region of the welded joints. In this study, a novel welding strategy is proposed by integrating fiber laser welding with thermally stable Ce-containing rare earth precipitates. This approach enables the tailored regulation of precipitate structures in both the fusion zone and HAZ, simultaneously refining precipitate distribution, narrowing the HAZ width and mitigating softening, thereby enhancing the overall mechanical performance of the joint. The results reveal the formation of numerous micron- and submicron-sized precipitates within the fusion zone, which are dispersed along dendritic arm boundaries. These particles serve to effectively pin dislocations and hinder their movement during deformation, contributing to fusion zone strengthening. Meanwhile, the thermally stable rare earth precipitates in the HAZ help preserve the original precipitate structure of the alloy, maintaining the HAZ width at around 100 μm after thermal cycling and substantially reducing microstructural degradation caused by welding. Tensile testing confirms that, with Ce micro alloying and optimized laser welding parameters, the resulting joints exhibit excellent mechanical properties, achieving a lap shear strength of 74.4% relative to

the base metal. These findings validate the feasibility and effectiveness of the proposed welding strategy for high-quality joining of rare earth magnesium alloys.

Key words: rare earth; magnesium alloy; laser welding; microstructure; control mechanism

随着新能源汽车产业的快速发展,汽车轻量化成为提升能源利用效率和续航能力的重要技术路径,这对高比强度、低密度材料提出更高要求^[1-2]。在众多轻质金属材料中,镁合金因其密度仅为 1.74 g/cm^3 ,被誉为最轻的金属结构材料,在汽车制造业展现出巨大的应用潜力,已广泛应用于方向盘、座椅骨架、仪表支架、杯托、折叠桌板、尾箱盖甚至轮毂等关键结构部件^[3-4]。然而,镁合金的密排六方晶体结构(hexagonal close-packed, HCP)及其独特的外层电子构型($\text{Mg}, 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$),致使镁合金表现出本征的低强度和弱塑性等缺陷^[5],严重制约镁合金在工程领域的进一步应用。为突破这一瓶颈,往往精心添加合金元素以产生固溶强化、细晶强化、沉淀强化等效果,改善镁合金强度和塑性关系^[6]。然而,合金元素改善镁合金力学性能的同时,引入的复杂析出相体系对后续镁合金的连接带来严峻挑战^[7]。

在各类合金化元素中,轻稀土元素铈(Ce)因其独特的电子结构与较高的化学活性,成为改善镁合金性能的重要选择^[8]。Ce元素的添加不仅能够在合金内形成热稳定性较高的稀土金属间化合物(如 Al_2Ce 、 Al_3Ce 、 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 等)^[9],显著提升材料的高温强度、热稳定性和抗蠕变性能^[8],还可对合金的微观组织结构与力学性能产生积极影响。例如, Li等^[10]研究发现,在AZ31镁合金中添加Ce元素能够诱导 Al_4Ce 析出相的形成,有效抑制 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相的生成并细化晶粒;当Ce质量分数达4%时,晶粒细化效果最佳。Wang等^[11]进一步研究Ce对镁合金热变形行为及组织演变的影响,研究结果表明所形成的含Ce金属间化合物能有效钉扎位错和晶界,阻碍位错的运动和晶界的迁移,从而显著提高合金的抗拉强度;此外,颗粒状 Al_4Ce 还能提高再结晶驱动力,促进动态再结晶并降低位错密度。Su等^[12]在铸态AZ系镁合金中也观察到Ce元素类似的合金化作用。

尽管Ce及其形成的稀土析出相具备较高的热稳定性,但必须指出,镁合金中的多数析出相在历经焊接热循环后,仍面临严重的组织重构问题^[13]。以AZ系列镁合金为例,AZ镁合金内最重要析出相 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相的熔点仅为 $437\text{ }^\circ\text{C}$ ^[14],而其软化温

度则更低;即便稀土析出相具有高得多的熔点^[15],典型由Ce组成的稀土析出相如 Al_2Ce 、 Al_3Ce 、 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 的熔点也仅为 855 、 973 、 $1020\text{ }^\circ\text{C}$ ^[9]。显然,在焊接热循环的作用下,这些析出相可能发生熔化、迁移甚至相变,破坏合金原有析出相结构、降低合金的力学性能,这一现象已被认为是焊接接头力学性能下降的根本原因。因此,深入研究焊接热循环过程中这些析出相(包括常规元素和稀土元素组成的析出相)微观尺度下的演变机制,对于改善镁合金的连接质量至关重要^[16]。

激光焊接虽然以能量密度高、焊接速度快著称,但激光焊依然是典型的熔焊工艺,涵盖金属的快速熔化、凝固、冷却等典型的热循环过程^[17]。值得注意的是,在激光束的高频震荡和衍射作用下,焊接熔池内存在剧烈的金属流动与热流搅拌效应,易使析出相出现熔化、破碎,并在冷却过程中重新弥散分布于基体之中^[18]。显然,如果能将高热力学稳定性的稀土析出相与激光焊接相结合,一方面形成弥散分布的质点,另一方面维持热影响区原有的析出相结构,对于改善镁合金焊接接头力学性能,尤其是缓解焊接热影响区的软化,具有重大的科学价值^[19]。然而,目前关于稀土析出相在激光焊接过程中的演变机制尚不清晰,尤其是在激光热流搅拌作用下,其弥散行为、热影响区内析出相的稳定性、迁移与团聚规律等关键问题仍缺乏系统研究^[20]。因此,有必要从焊缝成形与组织演化机制出发,深入揭示激光焊过程中稀土析出相的微观行为。

本工作以添加Ce元素的稀土镁合金为研究对象,采用光纤激光焊接技术,成功实现稀土镁合金的连接。通过微观组织、力学性能等多种表征手段,对焊接接头的微观组织进行系统分析,揭示熔化区微米/亚微米级颗粒的形成机制,阐明热影响区内析出相的熔化、迁移、团聚机理,为实现高性能稀土镁合金的激光焊接提供理论依据与工艺优化方向。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本工作所使用的材料为含稀土元素Ce(质量

分数为 0.4%, 下同)的铸态镁合金板材, 其成分与力学性能列于表 1 和表 2。在焊接前, 将合金材料加工为尺寸为 40 mm × 20 mm × 0.7 mm 的矩形薄片; 随后, 用 1000 目砂纸对材料表面进行机械打磨, 去除氧化层和表面杂质, 提升激光束与材料的耦合效率。打磨后, 样品经丙酮清洗去除油污, 并充分干燥, 随后固定在焊接工作台上进行激光焊接。

表 1 母材的成分(质量分数/%)

Table 1 Composition of base materials (mass fraction/%)

Al	Zn	Ce	Mn	Si	Fe	Mg
3.156	1.098	0.4	0.385	0.167	0.029	Bal.

表 2 母材的力学性能

Table 2 Mechanical properties of base materials

Material	Ultimate tensile strength	Elongation
AZ31-0.4%Ce	176.6 MPa	13%

1.2 焊接工艺

焊接实验采用由 IPG YLS-2000TR 型光纤激光器与 KUKA KR 30 R2100 工业机械臂构成的自动化激光焊接系统。焊接采用搭接焊形式, 搭接长度为 20 mm。激光焊接的关键参数: 激光功率(P) 500 W, 焊接速度 80 mm/s, 激光束与垂直方向呈 15°倾角, 激光头端面距工件上表面 50 mm, 光束焦点位于工件表面, 即离焦量(Δf)为 0 mm, 激光束在工件表面形成的光斑直径约 0.3 mm。为防止焊接过程中金属表面氧化, 焊接区域采用高纯氦气作为保护气体, 喷吹方向与焊接方向呈 45°, 气体流量控制为 20 L/min。保护气氛持续供给直至焊接接头完全冷却, 确保整个焊接与冷却过程处于稳定的保护氛围之下。

1.3 微观组织分析

为深入研究激光焊接接头的微观组织特征与

析出相演化规律, 首先通过线切割设备从焊缝切取分析样品; 然后, 对分析样品依次进行镶嵌、粗磨、细磨、抛光以及腐蚀处理, 并进行金相分析。其中, 腐蚀液由 1 mL 硝酸、1 g 草酸与 98 mL 水配制而成, 腐蚀时间为 10 s。微观组织观察和焊缝轮廓测量主要借助 Keyence VHX-6000 光学显微镜系统(OM)和 Zeiss EVO MA 10 扫描电子显微镜(SEM)进行; 而元素和物相分析则主要通过 Zeiss EVO MA 10 内置的 Oxford X-Max 能谱仪(EDS)和 Bruker D8 Advance X 射线衍射仪(XRD)完成。焊接接头的拉剪测试在 Care IBTC-5000 原位拉伸实验系统内完成, 加载速率设定为 1 mm/min, 拉伸断裂后, 通过 SEM 对断口形貌进行观察和分析, 揭示焊接接头的断裂模式及其与微观组织之间的关系。显微硬度测试则通过 HV-1000 型显微硬度计完成, 载荷 100 g, 保压时间 10 s。

2 结果与分析

2.1 母材的微观组织

所用 0.4% Ce 的铸态稀土镁合金的微观组织如图 1 所示。可以发现, 析出相主要分布于晶界, 晶粒内则零星分布少量尺寸较小的析出相, 析出相的形貌主要为针状、岛状和颗粒状。为进一步明确析出相的物相组成, 对母材进行 X 射线衍射分析。检测结果表明, 母材内主要的析出相包括 $Mg_{17}Al_{12}$ 和 $Al_{11}Ce_3$, 此外还存在 $Al_{10}Ce_2Mn_7$ 和 $MgZn_2$ 等微量相, XRD 结果如图 2 所示。

2.2 焊接接头的宏观形貌

激光焊接完成后, 焊缝的宏观形貌如图 3 所示, 可以看出焊缝整体呈规则的鱼鳞状、波纹清晰、宽度均匀、未发现明显的焊接缺陷(如咬边、塌陷、气孔、夹渣、飞溅等), 说明焊缝成型良好、焊接工艺参数匹配合理。通过 Keyence VHX-6000 超景

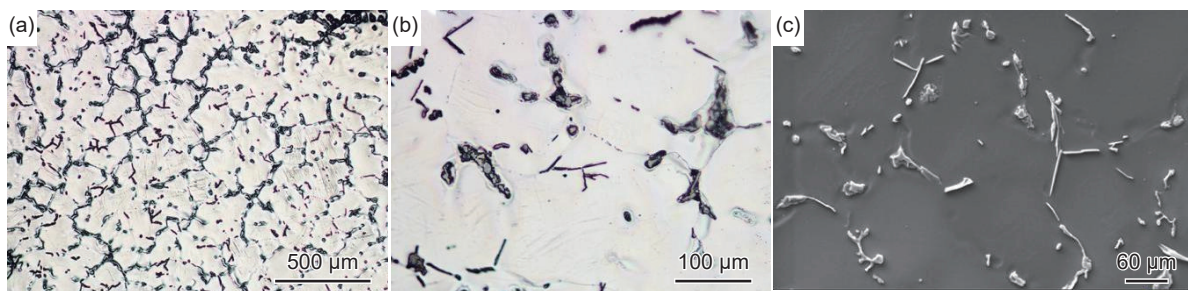


图 1 含 Ce 稀土镁合金的微观组织 (a) 微观组织; (b) 主要的析出相形貌; (c) 析出相 SEM 图

Fig. 1 Microstructures of Ce-containing rare earth Mg alloys (a) microstructure; (b) morphology of the primary precipitates; (c) SEM image of the precipitates

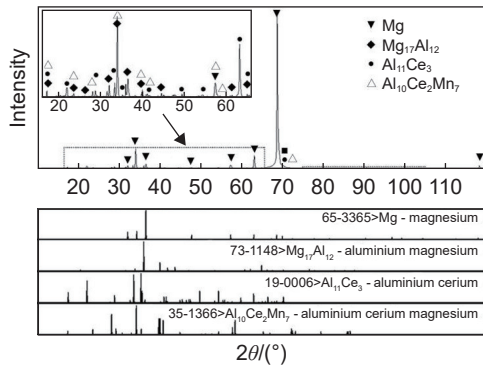


图 2 母材内主要析出相的 XRD 物相分析

Fig. 2 Phase analysis of precipitates in base materials

深显微镜对焊缝三维轮廓测量发现, 焊缝宽度约 1.2 mm, 焊缝上表面略微隆起, 表面光滑, 隆起高度约 120 μm。

2.3 焊接接头的微观组织

沿焊缝截面方向对焊接接头进行线切割处理, 发现焊缝整体呈典型的漏斗形态, 激光光束熔穿上下两片镁板。由于焊接过程中, 激光光束与焊接方向呈 75°, 焊缝的轴线同样与垂直方向存在一定的偏离, 焊接接头截面形貌如图 4 所示。值得注意的是, 焊缝内未发现明显的焊接缺陷, 如塌陷、气孔、缩孔等。测量发现, 焊缝熔化区上端面宽度约 1.22 mm,

两片镁板接触面处的熔化宽度为 0.73 mm, 均大于单片镁合金板的厚度(0.7 mm), 说明焊缝已充分熔合, 对于提升焊接接头强度具有积极意义。

进一步放大焊缝微观组织, 可以发现镁合金激光焊缝的热影响区很窄, 宽度仅 100 μm 左右, 热影响区的微观组织如图 5(a)、(b) 所示。可以看出, 热影响区内的析出相普遍呈球状或圆润的岛状。这种形貌显然是由于激光焊接过程中短时间、高能量输入使合金内原有析出相发生局部熔化、迁移和团聚, 并在液体表面张力的作用下冷却、凝固所致, 从而形成表面张力主导下的球状或圆润岛状特征。图 5(c) 进一步展示析出相沿晶界迁移与聚集的特征形貌, 印证其迁移形成机制。

借助 EDS 能谱进一步分析热影响区团聚的析出相成分, 发现其组成元素主要为 Mg、Al 和 Zn 元素, 其中 Mg 与 Al 的原子比接近 3:2, 推断为 Mg₁₇Al₁₂ 相, EDS 结果展示于图 6。结合 Mg-Al-Zn 系合金中主要析出相的形貌特征及图 6(a) 所观察到的结果, 热影响区球状析出相的形成机制: 在焊接热循环作用下, 热影响区内低熔点的 Mg₁₇Al₁₂ (熔点 437 °C) 和 MgZn₂ (熔点 342 °C) 相发生熔化, 并沿晶界迁移、团聚, 最终形成由 Mg₁₇Al₁₂ 和 MgZn₂ 组成的共晶组织。另外, 需要指出的是, 热

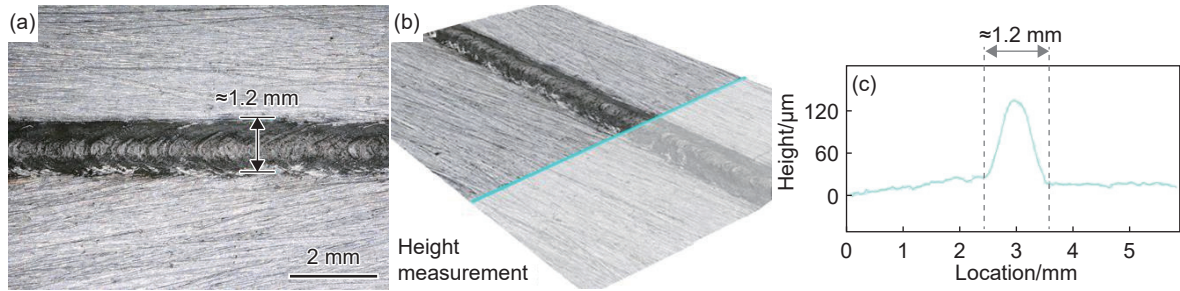


图 3 焊缝宏观形貌 (a) 焊缝形貌; (b) 焊缝三维形貌; (c) 焊缝轮廓曲线

Fig. 3 Macro morphologies of the weld (a) morphology of the weld; (b) 3D morphology of the weld; (c) profile curve of the weld

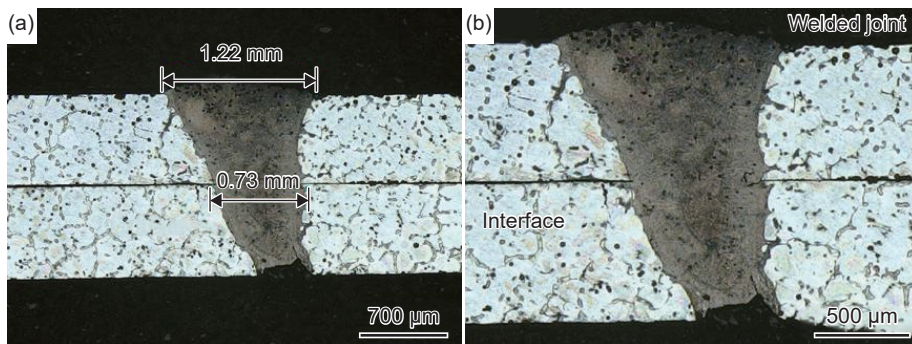


图 4 焊缝截面形貌 (a) 焊缝截面; (b) 熔化区放大图

Fig. 4 Cross-sectional morphologies of the weld (a) cross section of the weld; (b) magnified view of the fusion zone

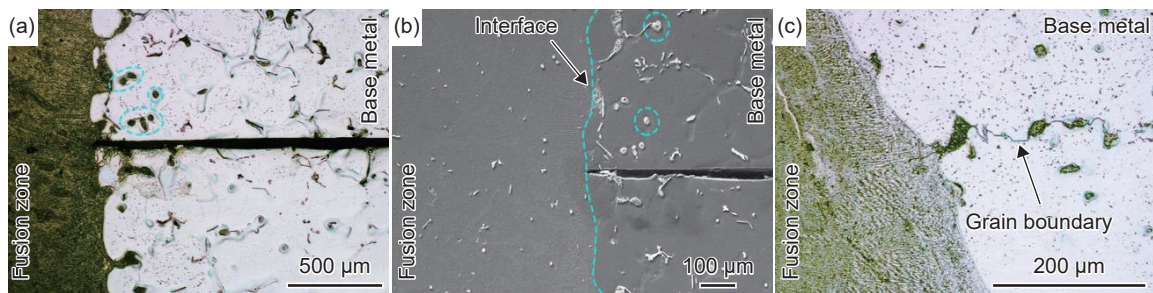


图 5 热影响区的微观组织 (a)光镜图;(b)电镜图;(c)析出相沿晶界迁移
Fig. 5 Microstructures of heat-affected zones (a) optical micrograph; (b) SEM image; (c) migration of precipitates along grain boundaries

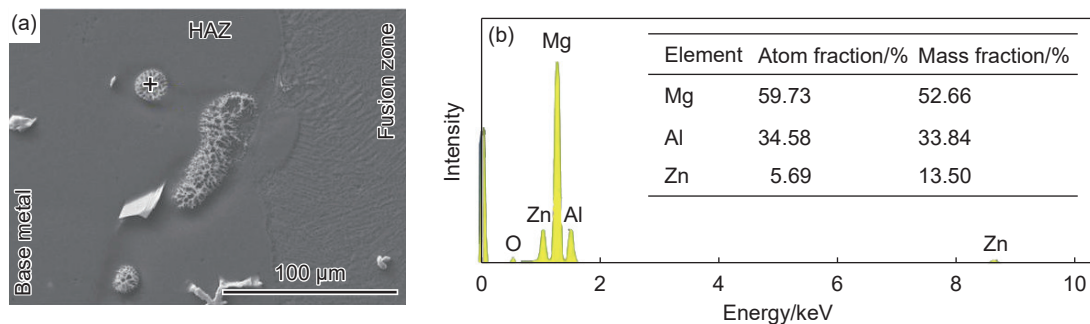


图 6 团聚物 EDS 元素组成 (a)团聚物 SEM 形貌;(b)元素组成
Fig. 6 EDS elemental composition of agglomerates (a) SEM morphology of agglomerates; (b) elemental composition

影响区的温度虽高于部分低熔点析出相的熔点,但仍低于镁基体的熔点(熔点 $648\text{ }^{\circ}\text{C}$),并明显低于稀土析出相的熔点。因此,热影响区内的高熔点的稀土相(如 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 等)在焊接热循环中保持稳定,其形貌、分布并未发生改变,这在图 5(b)中得到验证。高热稳定性的稀土相在一定程度上有助于维持热影响区微观结构的稳定,减缓热循环带来的组织改变。

焊缝熔化区的微观组织如图 7 所示,从图 7(b)、(c)可以看出,熔化区内形成大量微米/亚微米级颗粒,这些颗粒弥散、均匀分布,有效促进熔化区力学性能的提升。另外,熔化区内发现部分尺寸稍大的析出相颗粒,其形貌、分布与微米/亚微米级颗粒明

显不一致,通过 EDS 元素分析发现,其主要组成元素为 Al 和 Ce(图 8),证明熔化区内还存在部分破碎的稀土析出相颗粒。

图 8 进一步展示熔化区内析出相的放大图(SEM 图),可以清晰地看到常规析出相和稀土析出相的分布特点。图 8(b)、(c)对稀土析出相的 EDS 分析进一步证明,熔化区内的颗粒析出相既包括由常规合金元素组成的析出相,也包括稀土析出相,两者弥散分布,促进熔化区力学性能的提升。

2.4 焊接接头的力学性能

镁合金薄板的连接形式为搭接,因此,焊接接头的力学性能主要通过拉剪测试进行评估,其测试示意图如图 9(a)所示。需要特别说明的是,由于拉

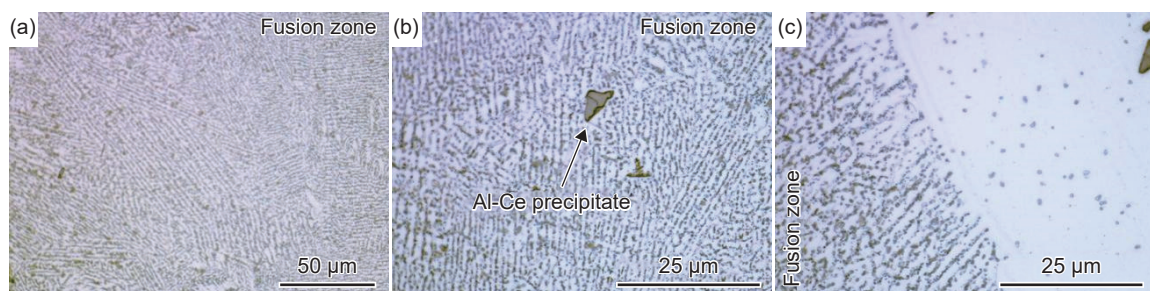


图 7 熔化区的微观组织 (a)熔化区微观形貌;(b)熔化区内的析出相;(c)熔化区与母材的界面
Fig. 7 Microstructures of fusion zones (a) microstructure of the fusion zone; (b) precipitates within the fusion zone; (c) interface between the fusion zone and the base metal

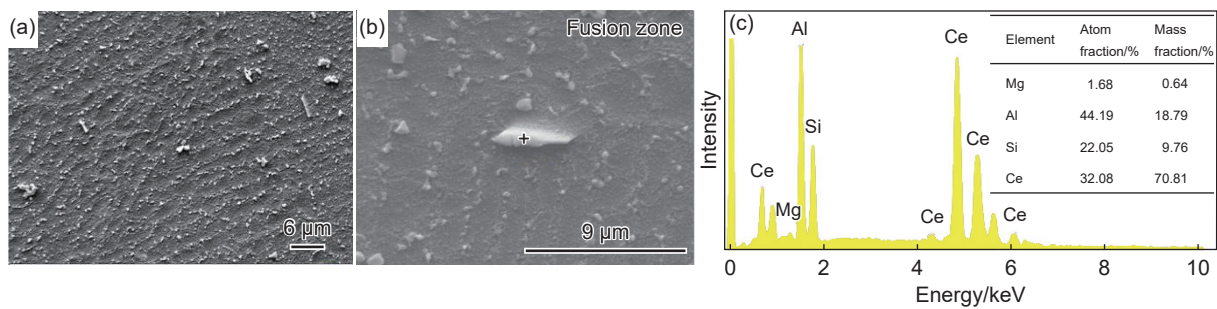


图8 熔化区内的析出相分析 (a)析出相 SEM图;(b)EDS测试位置;(c)EDS结果

Fig. 8 Analysis of precipitates in the fusion zones (a) SEM image of precipitates; (b) EDS test location; (c) EDS results

剪试样由厚度为 0.7 mm 的薄板组成, 测试过程中随着载荷的加载, 熔化区首先发生塑性变形并逐渐产生旋转, 从而带动熔化区外的镁合金薄板自由端翘起, 最终促使两片镁板的厚度中心重合。图 9(b) 展示拉剪测试完成后两片薄板厚度方向完全重合的形貌, 有助于更直观地理解该类薄板焊接接头在拉剪载荷下真实的受力状态。显然, 在这一过程中所记录的拉剪力实际反映的是单片薄板轴向的拉伸力。

拉剪测试结果如图 9(c) 所示, 焊接接头在 460 N 的载荷作用下发生断裂, 断裂位置位于母材与熔化区的结合界面, 即热影响区。结果表明, 热

影响区在焊接热循环过程中出现一定程度的软化, 热影响区的软化使该区域成为整个焊接接头的最薄弱区域。考虑到拉剪样品的有效截面积为 $4.9 \text{ mm} \times 0.7 \text{ mm}$, 可计算得到焊接接头的抗拉强度约为 134.1 MPa。作为对比, 图 9(c) 给出尺寸相同 ($5 \text{ mm} \times 0.7 \text{ mm}$) 的镁合金母材的拉剪曲线, 其断裂载荷为 618 N, 对应的抗拉强度为 176.6 MPa。因此, 通过光纤激光焊接工艺连接含 Ce 稀土镁合金, 所得到的焊接接头的强度能够维持在母材强度的 74.4%, 表明该焊接工艺在保证接头强度方面具有一定的可行性。

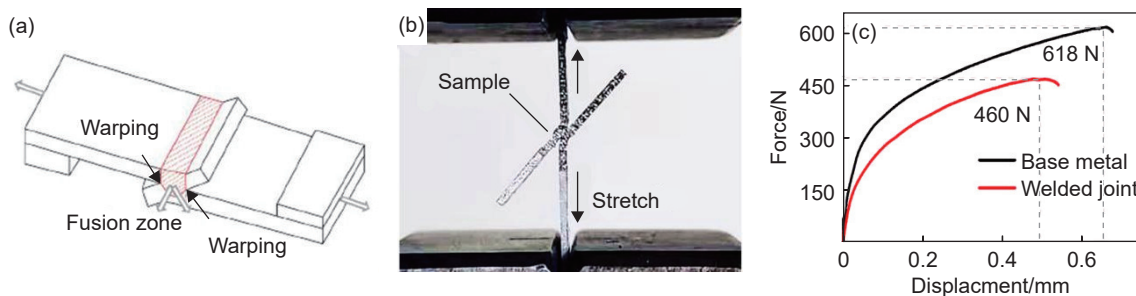


图9 焊缝拉伸测试结果 (a)拉剪测试示意图;(b)拉剪样品受力状态;(c)拉剪力曲线

Fig. 9 Tensile test results of the welded joint (a) schematic of the tensile shear test; (b) stress state of the tensile shear specimen; (c) tensile shear force-displacement curves

将拉剪断口置于扫描电镜内观察可以发现, 断口断裂位置位于母材与熔化区的结合界面, 断口截面形貌如图 10(a) 所示, 能够看到少量残留的母材, 侧面印证焊接热影响区出现软化且成为焊接接头薄弱区域。图 11 为断口表面析出相, BSE 元素衬度图发现 (图 11(b)), 断口表面分布大量的稀土元素, 由于稀土析出相与镁基体呈非共格界面关系, 热影响区内熔化、迁移、聚集的稀土析出相成为裂纹源, 在载荷作用下应力集中、诱导微裂纹的萌生与扩展, 并最终导致焊接接头在热影响区断裂。进一步佐证非共格析出相界面的开裂一定程度促进焊接接头的断裂失效。

通过显微硬度计重点测试熔化区与热影响区连接界面的硬度分布, 获得图 12(b) 所示的硬度曲线。显然, 热影响区的硬度平均值降低至 44.78HV, 低于母材的硬度 53.16HV, 表明在焊接热循环作用下, 热影响区组织发生软化。而熔化区由于形成弥散分布的微米、亚微米析出相结构, 强度上升至 69.92HV。显微硬度分布数据从侧面反映母材区、热影响区、熔化区微观组织对合金力学性能的影响。

2.5 激光焊接接头强化机制

图 12 为母材区与熔化区连接界面附近的硬度。可以看出, 热影响区出现一定程度的软化, 导

致焊接接头在拉伸过程中, 裂纹优先起源于熔化区与母材的结合界面。但需要注意的是, 热影响区内的稀土析出相依旧保留其原始形态和分布, 一定程度上维持热影响区的力学性能。然而, 热影响区内由常规合金元素形成的析出相, 如 $Mg_{17}Al_{12}$ 、 $MgZn_2$ 等, 则出现典型的熔化、迁移、团聚行为, 并沿着晶界迁移并渗入晶粒/子晶粒之间的间隙, 进一步削弱热影响区的力学性能。需要指出的是, $Mg_{17}Al_{12}$ 和 $MgZn_2$ 等析出相与镁基体均呈非共格界面关系, 析出相与镁基体之间的界面结合力很弱^[21]。显

然, 在拉伸载荷作用下, 这些尺寸较大、界面结合较弱的相界面优先开裂, 成为裂纹源, 这是热影响区软化对焊接接头力学性能影响的主要机制。

相比之下, 熔化区内形成大量的微米/亚微米级析出相, 并且这些析出相均匀、弥散地分布在枝晶臂边缘。根据经典的 Orowan 机制^[22], 弥散分布的析出相能够有效地钉扎位错、阻碍变形过程中位错的运动, 从而显著提高熔化区的强度^[23]。另外, 位错绕过微米/亚微米级析出相时, 能够进一步产生环绕这些颗粒析出相的位错环, 进而产生额外的

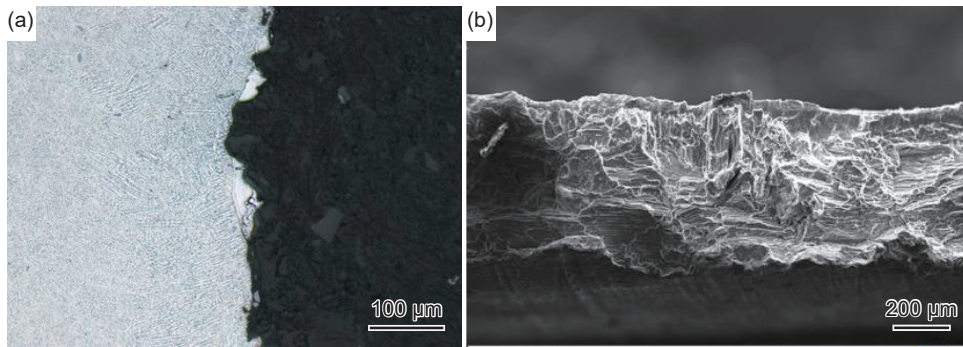


图 10 拉伸断口形貌 (a)截面; (b)表面

Fig. 10 Fracture morphologies of the joint (a) cross section; (b) surface morphology

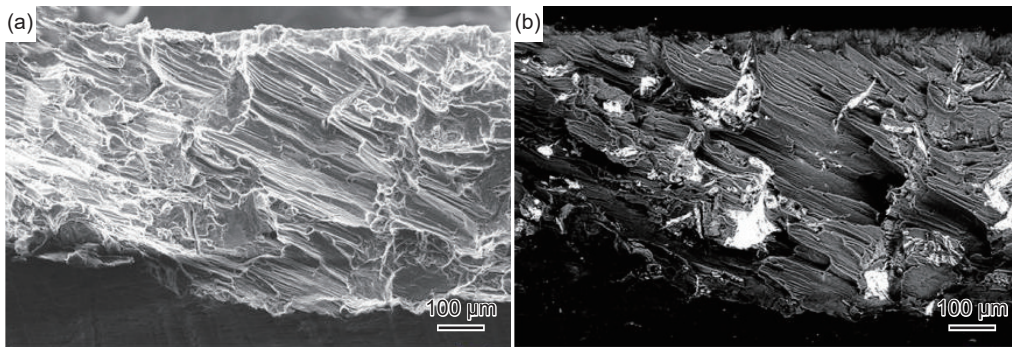


图 11 断口表面析出相 (a)SEM 图; (b)BSE 图

Fig. 11 Precipitates on the fracture surface (a) SEM image; (b) BSE image

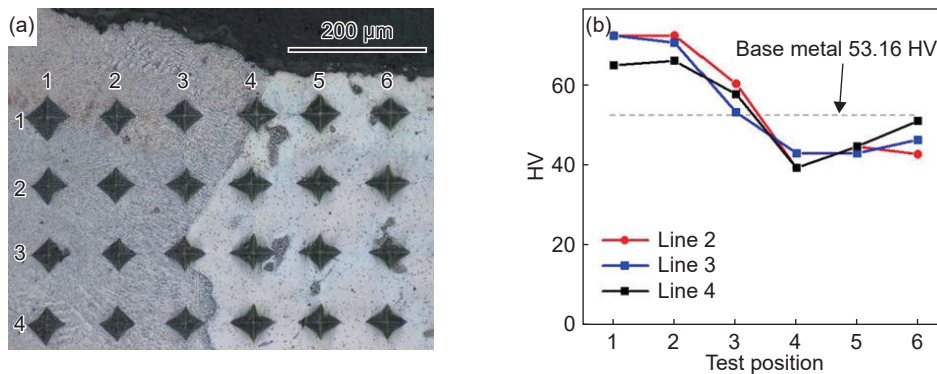


图 12 母材区与熔化区连接界面附近的硬度分布 (a)压痕位置; (b)硬度曲线

Fig. 12 Microhardness profile across the interface between the base metal and the fusion zone (a) indentation locations; (b) hardness profile

合金强化^[23]。显然,微纳尺度的弥散析出相是理想的合金强化结构,而这正是本工作中,焊缝熔化区的析出相形貌和分布的主要特征,从微观层面很好地揭示激光焊接接头强化的内在原理。

3 结论

(1)通过光纤激光器,成功焊接厚度 0.7 mm 的 0.4% Ce 稀土镁合金。对焊缝宏观形貌的分析发现,激光焊缝熔穿两片镁板,但并没有出现焊缝塌陷等缺陷;焊缝融化区上表面的宽度约 1.22 mm,两片镁板接触界面的融化区宽度约 0.73 mm,均大于单片镁板的厚度。

(2)融化区内形成大量的微米/亚微米级析出相颗粒,这些颗粒整齐地分布在枝晶臂边缘,有效提高融化区力学性能。而凝固过程中, Mg-Al、Al-Ce 析出相沿枝晶边缘析出,以及高冷却速率下融化区的快速凝固,是这些析出相形成的主要原因。

(3)对热影响区微观组织的分析发现,热影响区内的析出相出现熔化、迁移、团聚行为,显著改变热影响区内的析出相结构;强化结构的改变导致热影响区的软化,使该区域成为焊接接头的薄弱点。

(4)焊接接头优先在融化区与母材区的结合界面断裂,焊接接头拉剪强度约 134.1 MPa,达母材抗拉强度的 74.4%,结果表明通过激光焊接实现含 Ce 稀土镁合金高质量连接的可行性。

参考文献:

- [1] 李光霁,刘新玲.汽车轻量化技术的研究现状综述[J].*材料科学与工艺*,2020,28(5):47-61.
LI G J, LIU X L. Literature review on research and development of automotive lightweight technology[J]. *Materials Science and Technology*, 2020, 28(5): 47-61.
- [2] 张越,卢岩,彭锐涛,等.轻量化材料新型连接工艺与应用现状[J].*机械工程学报*,2024,60(4):259-283.
ZHANG Y, LU Y, PENG R T, et al. New connection technology and application status of lightweight materials[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(4): 259-283.
- [3] 徐世伟,纪志康,肖培杰,等.汽车轻量化技术研究现状及展望[J].*汽车安全与节能学报*,2025(1):16-31.
XU S W, JI Z K, XIAO P J, et al. Status and prospect of automobile lightweight technology[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2025(1): 16-31.
- [4] 武千业,吴玉娟,邓庆琛,等.镁合金及其镁基材料增材制造技术研究现状与展望[J].*有色金属工程*,2024,14(12):63-82.
WU Q Y, WU Y J, DENG Q C, et al. Additive manufacturing of magnesium alloys: a review[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2024, 14(12): 63-82.
- [5] 张磊,许帅康,陈洁,等.列车车体轻量化设计研究进展[J].*机械工程学报*,2023,59(24):177-196.
ZHANG L, XU S K, CHEN J, et al. Research progress in lightweight design of train body[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(24): 177-196.
- [6] 徐南平,丁文江,魏炳波,等.前言:镁科学与技术的现状、突破与未来[J].*中国科学:技术科学*,2025,55(4):553.
XU N P, DING W J, WEI B B, et al. Preface: the current status, breakthroughs, and future of magnesium science and technology[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2025, 55(4): 553.
- [7] 陈宇豪,薛松柏,王博,等.汽车轻量化焊接技术发展现状与未来[J].*材料导报*,2019,33(增刊2):431-440.
CHEN Y H, XUE S B, WANG B, et al. Development status and future direction of welding technology in the automotive lightweight[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(Suppl 2): 431-440.
- [8] 张娜娜,李全安,陈晓亚,等.变形镁合金织构调控的研究进展[J].*材料热处理学报*,2024,45(8):13-26.
ZHANG N N, LI Q A, CHEN X Y, et al. Research progress on texture control of wrought magnesium alloys[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2024, 45(8): 13-26.
- [9] GAO M C, ÜNLÜ N, SHIFLET G J, et al. Reassessment of Al-Ce and Al-Nd binary systems supported by critical experiments and first-principles energy calculations[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, 36(12): 3269-3279.
- [10] LI Q, XIONG W, YU M H, et al. Effect of Ce content on performance of AZ31 magnesium alloy anode in air battery[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 891: 161914.
- [11] LI Z J, WANG J G, YAN R F, et al. Effect of Ce addition on hot deformation behavior and microstructure evolution of AZ80 magnesium alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 16: 1339-1352.
- [12] SU J, GUO F, CAI H S, et al. Structural analysis of Al-Ce compound phase in AZ-Ce cast magnesium alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(6): 6301-6307.
- [13] LUO Q, GUO Y L, LIU B, et al. Thermodynamics and kinetics of phase transformation in rare earth-magnesium alloys: a critical review[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 44: 171-190.
- [14] MATHUR H N, MAIER-KIENER V, KORTE-KERZEL

- S. Deformation in the γ -Mg₁₇Al₁₂ phase at 25-278 °C[J]. *Acta Materialia*, 2016, 113: 221-229.
- [15] YANG M L, CHEN C, WANG D S, et al. Biomedical rare-earth magnesium alloy: current status and future prospects[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2024, 12(4): 1260-1282.
- [16] 查敏, 顾焘, 马品奎, 等. 轻合金大型一体化结构部件压铸成形技术研究进展[J]. *特种铸造及有色合金*, 2024, 44(8): 1009-1022.
- ZHA M, GU T, MA P K, et al. Research progress in die-casting technology for large-scale integrated structural components of light alloy[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2024, 44(8): 1009-1022.
- [17] DAL M, FABBRO R. An overview of the state of art in laser welding simulation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 78: 2-14.
- [18] CAO X, JAHAZI M, IMMARIGEON J P, et al. A review of laser welding techniques for magnesium alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 171(2): 188-204.
- [19] 张明军, 李晨希, 邹江林, 等. AZ31B 镁合金功率调制环形光斑光纤激光焊接试验研究[J]. *机械工程学报*, 2025, 61(2): 151-161.
- ZHANG M J, LI C X, ZOU J L, et al. Experimental research on laser welding of AZ31B magnesium alloy using power-modulated ring-mode fiber laser[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2025, 61(2): 151-161.
- [20] 陈怡, 邹文兵, 郭龙涛, 等. 铸造镁合金的焊接修复技术研究现状及发展方向[J]. *材料导报*, 2020, 34(15): 15126-15131.
- CHEN Y, ZOU W B, GUO L T, et al. A review and development tendency of welding repair technology for cast magnesium alloy[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(15): 15126-15131.
- [21] WEILER J P. The role of the Mg₁₇Al₁₂-phase in the high-pressure die-cast magnesium-aluminum alloy system[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11(11): 4235-4246.
- [22] PENG S Y, WANG Z L, LI J, et al. Beyond Orowan hardening: mapping the four distinct mechanisms associated with dislocation-precipitate interaction[J]. *International Journal of Plasticity*, 2023, 169: 103710.
- [23] SUN G P, LEI M Y, LIU S, et al. Orowan strengthening with consideration of thermal activation[J]. *Computational Materials Science*, 2024, 233: 112720.

收稿日期: 2025-07-10; 录用日期: 2025-08-08

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目优秀青年项目(24B0986)

通讯作者: 陈燕飞(1990—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为有色金属连接, 联系地址: 江西省南昌市红谷滩区学府大道 999 号南昌大学先进制造学院(330031), E-mail: chenyanfei@ncu.edu.cn

(本文责编: 高磊)